

Ampliación y reforma del Museo de Bellas Artes de Bilbao

Museum of Fine Arts of Bilbao

Guillermo Blanco Fernández^a, Álvaro Serrano Corral^b, Luca Ceriani^c

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. MC2 Estudio de Ingeniería (Grupo TYPSA). Jefe de Proyectos. guillermo.blanco@mc2.es

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. MC2 Estudio de Ingeniería (Grupo TYPSA). Director Técnico. alvaro.serrano@mc2.es

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. MC2 Estudio de Ingeniería (Grupo TYPSA). Jefe de Proyectos. luca.ceriani@mc2.es

RESUMEN

La concepción arquitectónica de la ampliación del Museo de Bellas Artes de Bilbao se articula en torno a la idea de crear un volumen que se eleva sobre los edificios originales sin entrar en contacto con ellos, transmitiendo la sensación de ingravidez estructural, mientras que, funcionalmente, permite liberar el espacio bajo su estructura, respetando las edificaciones existentes y generando grandes espacios públicos cubiertos. Para hacer viable este concepto, el diseño estructural adquiere un papel central, proyectándose un “edificio-puente” de 55 m de luz que se eleva 14 m sobre la cota del suelo, apoyándose en dos alineaciones de esbeltos soportes tubulares en “V”.

ABSTRACT

The architectural concept for the expansion of the Museum of Fine Arts of Bilbao revolves around the idea of creating a volume that rises above the existing buildings without making contact with them, aiming to convey the sensation of a structure defying gravity, while functionally freeing the space beneath it to respect the existing constructions and create spacious covered public areas. To achieve this, the structural design plays a key role, featuring a ‘bridge-building’ with a 55-meter span that rises 14 meters above ground level, supported by two alignments of slender V-shaped tubular columns.

PALABRAS CLAVE: edificio-puente, estructura metálica, hormigón ligero, celosía, soportes en V, rehabilitación, acero verde

KEYWORDS: bridge-building, steel structure, lightweight concrete, truss, V-shaped columns, rehabilitation, low-carbon steel

1. Introducción

El Museo de Bellas Artes de Bilbao (MBAB), estaba originalmente conformado por dos volúmenes contruidos en 1945 y 1970, respectivamente, que se articulan en torno a la plaza de Arriaga. El proyecto de ampliación del museo responde a la necesidad de incrementar y mejorar sus espacios expositivos, generando 5400 m² de nueva superficie útil. Este proyecto, ha sido desarrollado en colaboración con los

estudios de arquitectura Foster + Partners, con quien MC2 ya había tenido la oportunidad de trabajar anteriormente en otros proyectos emblemáticos [1], y LMU Arkitektur. Se plantea un nuevo volumen aéreo concebido como un “edificio-puente” que se eleva sobre el ala central del edificio de 1945 y la plaza de Arriaga, y se conecta lateralmente con el módulo de 1970, el cual también experimenta un incremento en altura y numerosas intervenciones de rehabilitación estructural.

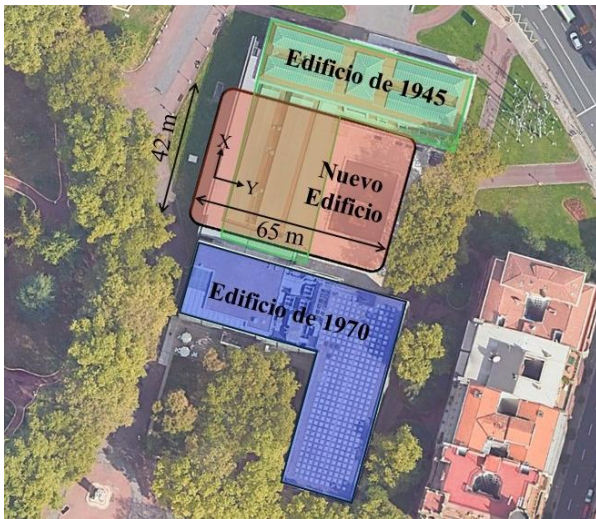


Figura 1. Planta de distribución del MBAB.

El carácter aéreo del nuevo edificio, que recibe el apelativo de *Agravitas*, permite crear amplios espacios expositivos con alturas considerables y excelente iluminación natural. Esto se consigue sin alterar los edificios originales, de gran valor histórico, y permitiendo, además, su construcción con una mínima afectación a la operatividad del museo, que ha permanecido abierto durante toda la obra.

2.Descripción geométrica y funcional de la ampliación

El nuevo edificio *Agravitas* presenta una planta rectangular de 2730 m² (65 m de longitud, en dirección Y, y 42 m de ancho, en dirección X) en dos niveles de planta transitable y una cubierta. La estructura apoya en dos alineaciones paralelas separadas 55 m entre sí, cada una constituida por tres soportes en V. Con un vano principal de 55 m de luz, la planta se completa con voladizos perimetrales de 8 m, según ilustra la Figura 2.

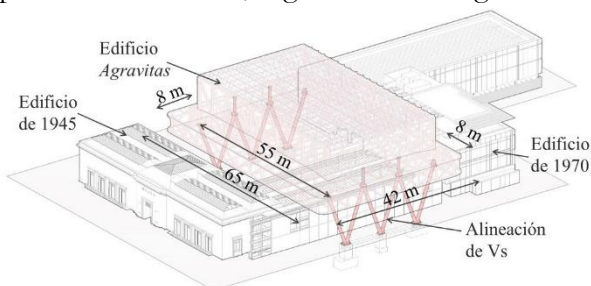


Figura 2. Descripción geométrica de la ampliación.

La planta inferior del nuevo edificio, denominada como P4, se sitúa a la cota de coronación de los soportes en V, a 14 m sobre el nivel del suelo. Esta planta reserva un 50 % de su superficie para uso expositivo, y el resto lo dedica a oficinas, espacios educativos y cuartos de instalaciones y almacenamiento.

La siguiente planta, denominada como P5, es totalmente diáfana y se dedica en su totalidad para uso expositivo, aprovechando la doble altura libre de 6 m hasta el nivel de cubierta. Esta planta es cubierta en el ámbito del edificio nuevo delimitado por los soportes en V, mientras que, en el área coincidente con los voladizos, se proyecta una terraza expositiva abierta.

Por último, se dispone una cubierta ligera cerrando el volumen cubierto de P5, accesible sólo para mantenimiento.

Cabe destacar también la presencia de unas franjas de planta adicionales en los niveles P4, P5 y cubierta, que cubren el espacio de 6.5 m entre el edificio nuevo y el existente de 1970, y que constituyen los accesos al edificio nuevo.



Figura 3. Sección transversal (fuente: F+P).

Los edificios originales de 1945 y 1970 también son objeto de actuación, dando lugar a una redistribución parcial de sus usos, la generación de nuevos núcleos de comunicación y evacuación, y proporcionando una protección generalizada frente a fuego adecuada a la normativa vigente. Desde el punto de vista estructural, estas modificaciones han requerido el desarrollo de un catálogo de intervenciones de cirugía estructural: desde el apeo de soportes hasta la ejecución de extensivos refuerzos de estructura metálica y de hormigón, y que no se tratan en esta comunicación.

3. Sistema estructural del nuevo edificio *Agravitas*

El edificio *Agravitas* se concibe con un esquema estructural de péndulo invertido, formado por celosías metálicas principales en dirección longitudinal (Y), que apoyan en los soportes extremos de las alineaciones de pilares en V, y que recogen familias de celosías transversales (X) sobre cuyos cordones (inferior y superior) se apoyan los niveles de forjado de P4 y P5.

La estructura metálica se ha proyectado en acero S355 N, con la excepción de los elementos primarios, como los soportes en V y celosías principales, que se desarrollan en acero S460 M (S460 HML en el caso de las Vs). En total, la estructura del edificio *Agravitas* emplea aproximadamente 1500 t de acero estructural.

Como parte de los criterios de sostenibilidad ambiental del proyecto se ha empleado acero de reducida huella de carbono, lo que permite disminuir en 3200 t las emisiones de CO₂e en comparación con un acero convencional.

3.1 Cargas de proyecto

Las cargas gravitatorias que tiene que resistir el sistema portante vertical son elevadas. Si bien las cargas muertas son moderadas, con valores entre 2 y 2.5 kN/m², las sobrecargas de uso son importantes, puesto que a la planta expositiva P5 se exige, por requerimiento de la Propiedad, una sobrecarga superficial de 8 kN/m² extendida a toda la planta, con el objetivo de admitir una amplia variedad de configuraciones expositivas. Esta condición también ha sido determinante en el estudio de los efectos locales, contemplando cargas puntuales de esculturas de hasta 170 kN, cargas distribuidas localmente de 14 kN/m² y otras situaciones especiales. La planta P4, en cambio, se dimensiona para una sobrecarga de uso de 5 kN/m², mientras que para la cubierta se ha considerado una sobrecarga de mantenimiento de 0.7 kN/m² y la sobrecarga de

nieve de 0.6 kN/m². Con el objetivo de reducir las cargas gravitatorias, los forjados de P4 y P5 se han proyectado como colaborantes con hormigón ligero.

En cuanto a las cargas horizontales, se han considerado tanto las acciones del viento como la acción sísmica, resultando ambas en reacciones basales de magnitud prácticamente equivalente para sus respectivas combinaciones de Estado Límite Último (ELU), con reacciones horizontales totales de 2500 kN en X y 1700 kN en Y. Cabe destacar que, pese a que la aceleración básica en Bilbao es de 0.04 g, el sismo se ha considerado debido al carácter de edificio singular con comportamiento de péndulo invertido e importantes excentricidades torsionales de eje vertical.

3.2 Cimentaciones

Se proyectan cimentaciones en los seis vértices inferiores de las dos alineaciones de soportes en V, con el objetivo de resistir tanto las cargas gravitatorias como las horizontales, en especial las provenientes de la dirección transversal (X).

A una profundidad de entre 3 y 5 m respecto del nivel del suelo afloran estratos de roca margocaliza sana. Sin embargo, la opción de cimentaciones superficiales no ha sido viable, ya que estas habrían requerido una superficie de apoyo mayor a la disponible, dada la proximidad del arranque de los soportes en V a los paramentos de sótano del edificio original de 1945. Por lo tanto, se han ejecutado seis encepados de hormigón HA-50 sobre micropilotes de 9 m de profundidad. El encepado más solicitado cuenta con un grupo de cuarenta micropilotes, y en total se han ejecutado aproximadamente 2.4 km de micropilotes. Para resistir las reacciones horizontales transversales (X), se ha dispuesto una viga riostra uniendo cada alineación de encepados, y se han ejecutado cuatro micropilotes inclinados en cada encepado de extremo de alineación, que se encargan de trasladar las reacciones horizontales a la roca

trabajando alternadamente en compresión y tracción.

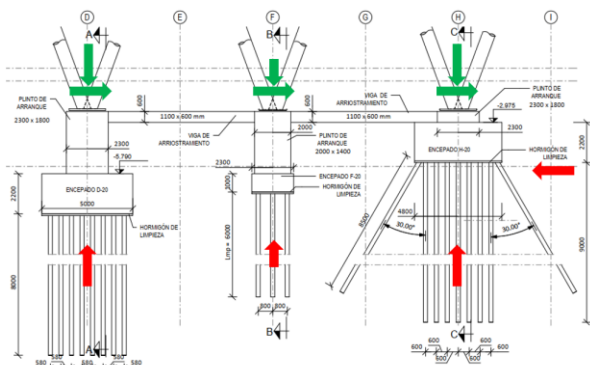


Figura 4. Esquema resistente de cimentación .

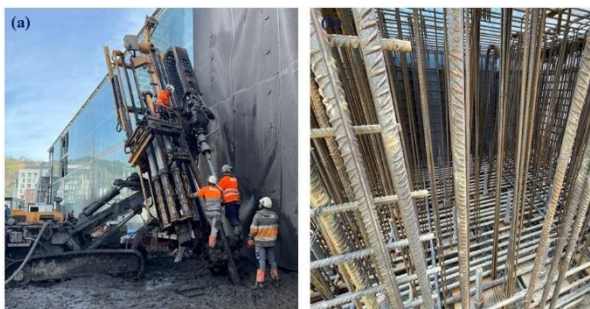


Figura 5. Ejecución de micropilotes inclinados (a) y armadura de encepado (b).

3.3 Soportes en V

Los soportes en V constituyen uno de los principales elementos distintivos del proyecto. Estos elementos vistos desafían los límites de esbeltez para lograr transmitir el concepto de estructura que levita. Cada una de las dos alineaciones dispone de tres Vs conformadas por tubos metálicos de 14.8 m de longitud, inclinados 21° respecto a la vertical, y con un diámetro seccional de 711 mm.

Así como la cimentación arriostra las Vs en arranque de soportes, éstos quedan unidos en su coronación mediante sendas celosías cargadero que permiten, además, generar los voladizos laterales y garantizar el correcto funcionamiento de las Vs como diafragma vertical.

Al apoyarse las celosías principales en los soportes extremos de las Vs, son éstos los responsables de transferir la mayor parte de la carga vertical a las cimentaciones, alcanzando axiles máximos de 32 200 kN en ELU, según se

esquematiza en la Figura 7. Por ello, los soportes en V han sido dimensionados con espesores de 100 y 80 mm (CHS711.100 y CHS711.80) en acero S460 HML.

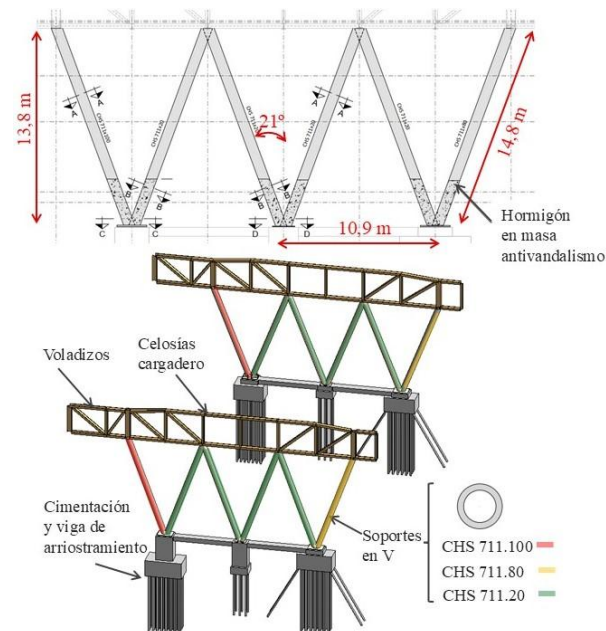


Figura 6. Alzado y perspectiva 3D del sistema portante de cimentación y Vs.

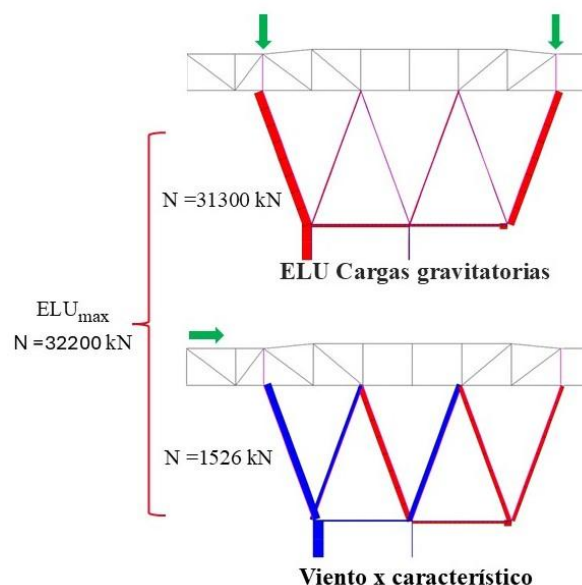


Figura 7. Esquema esfuerzos axiales en las Vs.

La Figura 8 muestra la fabricación de los tubos en taller (a), la placa de arranque y anclaje (b) que incluye 82 pernos conectores y una llave de cortante mediante un IPE500, y una de las fases de montaje de la celosía cargadero (c). La Figura 9 ilustra una alineación de Vs terminada.



Figura 8. Tubos de Vs (a), placa de anclaje (b) y montaje de celosía cargadero (c).

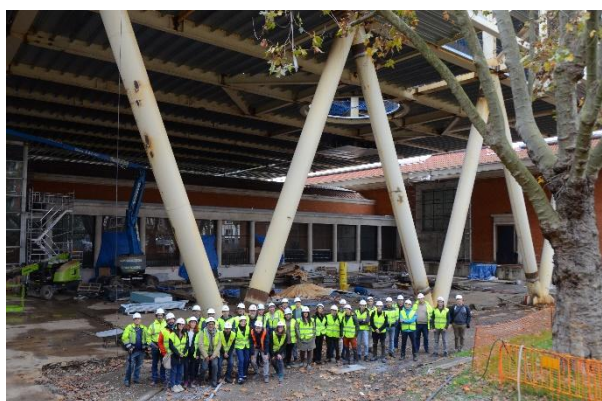


Figura 9. Alineación de Vs de la plaza de Arriaga.

3.4 Celosías principales

El gran vano del “Edificio-Puente” se resuelve mediante tres celosías principales longitudinales (en dirección Y), que se denominan A, C e I, según se muestra en la Figura 10.

Las celosías C e I apoyan con unión rígida sobre la cabeza de los soportes extremos de las Vs, y presentan un canto total de 13 m cubriendo la altura entre P4 y cubierta. En el Proyecto Constructivo, estas celosías se concibieron con dos cordones coincidentes con los niveles de P4 y cubierta. Durante la fase de ejecución, y a solicitud de la UTE constructora, se desarrolló una modificación del diseño para propiciar su montaje en dos fases mediante la agregación de un cordón intermedio, permitiendo hormigonar la planta P5 y utilizarla como plataforma de montaje del tramo de celosías entre P5 y

cubierta. Cabe destacar que estas dos celosías (C e I) han sido fabricadas con piezas de tipo cajón armado en acero S460 M.

La celosía A se apoya sobre los extremos de los voladizos generados por las vigas cargadero, coplanarias con las Vs, y únicamente cubre la altura entre P4 y P5, ya que P5 alberga la terraza expositiva. Esta celosía está conformada con perfiles laminados en acero S355, orientados con su eje fuerte en horizontal, con el objetivo de optimizar las uniones estructurales.

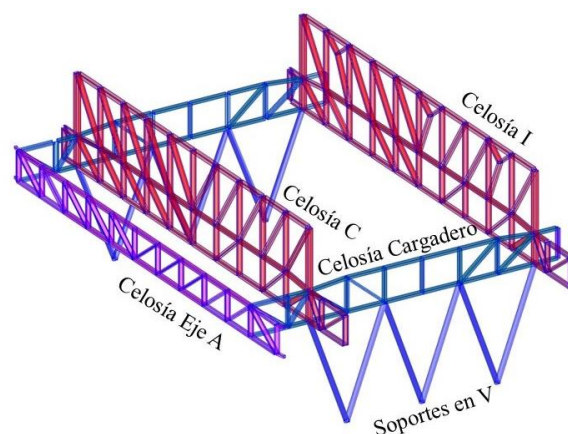


Figura 10. Esquema de celosías principales.



Figura 11. Izado (a) y posicionamiento (b) del tramo inferior (P4-P5) de la celosía I.



Figura 12. Celosías principales completas A y C.

Todas las uniones de las celosías principales son soldadas, motivo por el cual se ha prescrito la condición de suministro de laminado termomecánico (M) para los aceros de alta resistencia.

3.5 Celosías transversales

Apoyándose en los cordones inferior e intermedio de las celosías C e I, se proyecta una familia de celosías transversales (dirección X) separadas 5.085 m entre sí, que sustentan los niveles P4 y P5.

Estas celosías, fabricadas con perfiles laminados en acero S355 N con uniones soldadas, presentan diferentes configuraciones estructurales en función del uso asignado al espacio de P4, según se muestra en la Figura 13.

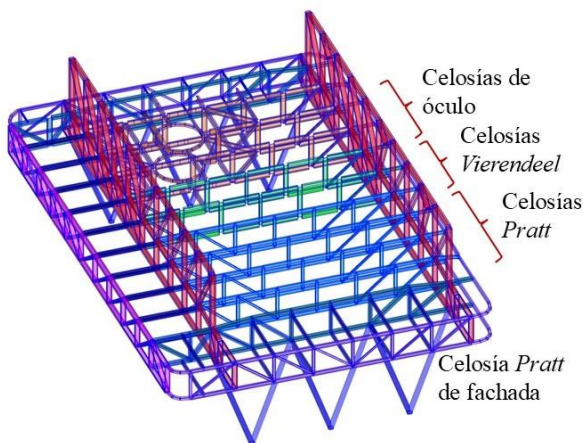


Figura 13. Esquema de celosías transversales.

Las cuatro primeras celosías ubicadas en la zona comprendida entre los soportes en V, que delimitan el área de instalaciones y almacenes de P4, son de tipo *Pratt*, pero mantienen los dos módulos centrales sin diagonales para permitir el paso de las obras de arte de gran tamaño.

Las siguientes dos celosías están situadas en la zona expositiva de P4, por lo que se han eliminado las diagonales centrales para evitar obstrucciones en la circulación, excepto en los módulos de los extremos. Como resultado, estas celosías trabajan predominantemente como estructuras tipo *Vierendeel*.

Las últimas tres celosías entre las alineaciones de Vs son las más singulares, ya que

incorporan un óculo central de 6.9 m de diámetro, permitiendo una visual directa desde la Plaza de Arriaga, a nivel de suelo, hasta la galería expositiva de P5, tal y como se puede apreciar en la fotografía de la Figura 15. Estas celosías funcionan también como *Vierendeel*.



Figura 14. Entramado de celosías longitudinales y transversales de P4 y P5.

En coincidencia con los ejes de los soportes en V, han dispuesto las celosías cargadero, descritas previamente en el apartado 3.3. Adicionalmente, en las fachadas laterales, se han proyectado celosías transversales de tipo *Pratt*, apoyadas en los voladizos generados entre P4 y P5 por las celosías principales.

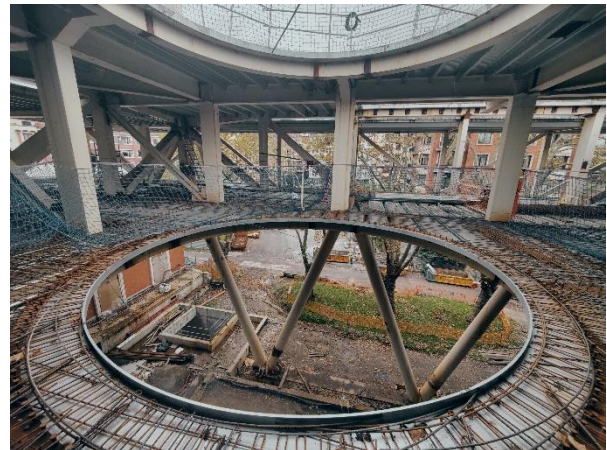


Figura 15. Celosías transversales *vierendeel* de óculo.

Por último, se ha de indicar que no toda la superficie de las plantas P4 y P5 está sustentada mediante celosías. En la zona de terraza expositiva de P5, y en la zona de P4 subyacente, el sistema portante está compuesto por una serie de vigas mixtas isostáticas, con luces de hasta 8 m y separación entre ejes de 5.085 m. De esta

forma, se logra generar un gran espacio diáfano en las zonas de uso de oficinas y educativo de P4.

3.6 Celosías de cubierta

La estructura de cubierta está compuesta por una familia de veintidós celosías transversales ligeras de tipo *Pratt*, fabricadas con perfiles laminados en acero S355 N, con un canto de 1 m y un intereje de 2,54 m. Estas celosías paralelas están arriostradas entre sí mediante correas que sustentan el panel pisable de cubierta, además de dos alineaciones de cruces de arriostramiento situadas a nivel del cordón superior.

Las celosías de cubierta se apoyan, a nivel de cordón superior, en rótulas mecanizadas soldadas al cordón superior de las celosías principales longitudinales. De esta forma se garantiza un comportamiento isostático de la cubierta y se logra que ésta pueda dilatarse y contraerse libremente, dentro de los límites establecidos por unos topes estructurales.

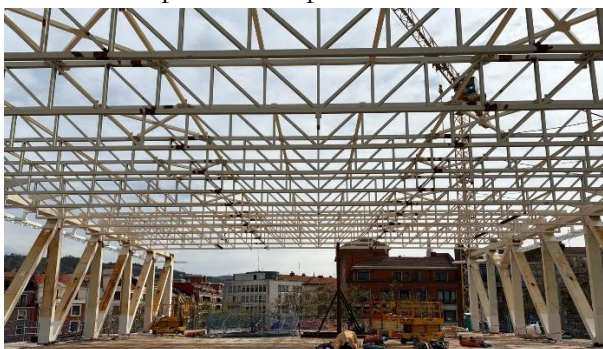


Figura 16. Fase de montaje de celosías de cubierta.

3.7 Pantalla de arriostramiento

La estabilidad frente a las acciones horizontales de viento y sismo en dirección transversal (X) se logra, como ya se ha mencionado en el apartado 3.3, mediante los dos planos de soportes en V, siguiendo el esquema representado en la Figura 17. Este sistema proporciona una gran rigidez, limitando las deformaciones en P5 a solo 6 mm ($H/2300$) frente al empuje transversal del viento.

En cambio, en dirección longitudinal (Y), la estructura es un pórtico de pilares muy esbeltos, constituido por los soportes en V, y un

dintel de gran rigidez formado por las celosías principales longitudinales. Este esquema carece de rigidez suficiente para resistir las acciones horizontales sin sufrir deformaciones muy pronunciadas. Para compensar esta carencia, se ha dispuesto una pantalla de hormigón armado HA-50, orientada en dirección Y, cuya función es absorber las reacciones producidas por las cargas horizontales en sentido longitudinal. Esta pantalla queda oculta en el interior del edificio colindante de 1970, es decir, conecta con la estructura del edificio nuevo en uno de sus laterales, generando por tanto una gran excentricidad de torsión de eje vertical frente a las acciones horizontales en Y. El momento torsor debido a esa excentricidad es recogido de forma muy eficaz por las dos alineaciones en V, según se representa en la Figura 18. La deformación que se produce a nivel de P5 frente al viento en dirección Y es de 5 mm ($H/2300$), o 16 mm ($H/850$) frente a sismo, considerando la pantalla fisurada.

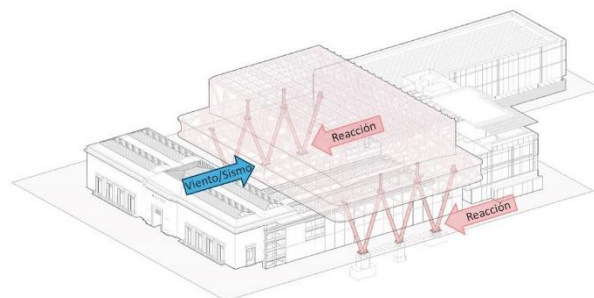


Figura 17. Esquema frente a acciones en X.

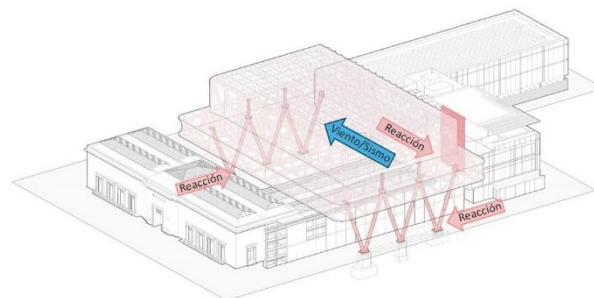


Figura 18. Esquema frente a acciones en Y.

La pantalla, de 17 m de altura desde el nivel de sótano del edificio de 1970 hasta el nivel P4, 5.7 m de ancho y 0.45 m de espesor, se ha armado teniendo en cuenta los criterios sísmicos para clase de ductilidad media (DCM) del Eurocódigo 8 [2]. Además, como su encaje en

cimentación se produce entre dos pilares existentes del edificio de 1970, se requiere un estrechamiento en su base, el cual se ha resuelto mediante un esquema de bielas y tirantes, como se muestra en la Figura 19.

La cimentación de la pantalla es profunda, y está conformada por 24 micropilotes, que trabajan alternadamente a compresión y tracción.

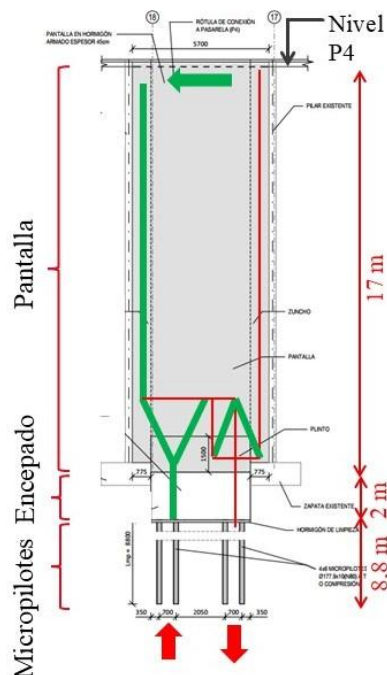


Figura 19. Alzado de la pantalla de arriostramiento.

3.8 Forjados de plantas P4 y P5

Los forjados de los niveles P4 y P5 se han materializado mediante un forjado mixto colaborante, con el objeto de facilitar su ejecución en una zona de difícil acceso debido a la presencia del edificio original de 1945 y los 14 m de altura desde la plaza de Arriaga.

La luz que debe salvar este forjado colaborante es de 5.085 m, que queda fuera de los límites alcanzables con un forjado de chapa plegada convencional. Por esta razón, ha sido necesario recurrir a una solución singular de forjado colaborante, como la que se ilustra en la Figura 20, con nervaduras metálicas de 220 mm de canto y una capa de compresión de 100 y 130 mm en P4 y P5 respectivamente. Aun así, debido a las sobrecargas elevadas (especialmente en P5) y con el fin de controlar las

deformaciones en la fase de hormigonado, se ha empleado un hormigón estructural ligero tipo HLE-30 de 1800 kg/m³ de densidad.

Dada la necesidad de soportar cargas puntuales de las obras de arte más pesadas, ha sido imprescindible incorporar armaduras de cortante en los nervios, especialmente en situación accidental de incendio, ya que el forjado se ha dimensionado para evitar tener que ignifugar la cara inferior de la chapa, actuación que habría sido especialmente compleja en P4, por estar a 14 m sobre el suelo. La Figura 21 muestra la planta P4 con el entramado de celosías transversales y el forjado colaborante de P4 y P5, el primero con la ferralla dispuesta y sin hormigonar.

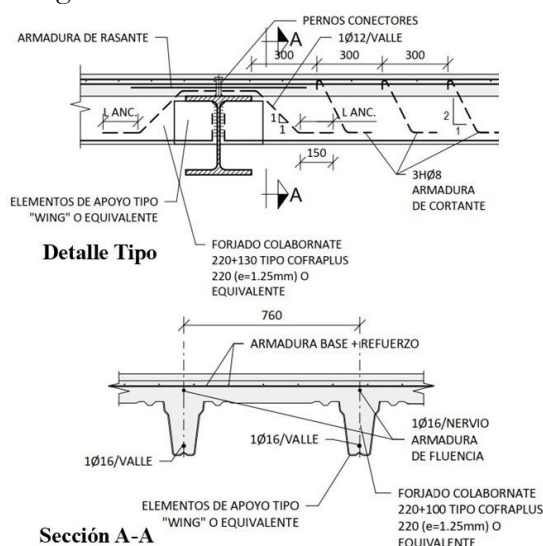


Figura 20. Secciones tipo de forjado



Figura 21. Vista de la planta P4.

3.9 Forjados basculantes

Para conectar el edificio nuevo con el de 1970, se ha proyectado una franja de forjado basculante, dada la gran deformación vertical

relativa entre la estructura existente y la del volumen *Agravitas*, que puede alcanzar valores de hasta 60 mm, originados por la sobrecarga de uso.

En P5 y cubierta, los forjados basculantes se han resuelto mediante vigas metálicas con uniones bulonadas que permiten el libre giro y los desplazamientos horizontales.

En cambio, en el forjado de P4, se deben impedir los desplazamientos horizontales, ya que este forjado es el que permite conectar el edificio nuevo a la pantalla de arriostramiento. La conexión basculante se ha resultado mediante un paño de losa maciza de 20 cm de espesor, apoyada en rótulas mecanizadas y conectadas al forjado del edificio nuevo y a la pantalla con pasadores tipo *Gonjon* colocados de tal forma que bloqueen el movimiento horizontal y dejen libre el vertical, es decir, girados 90° respecto a su disposición habitual.

4. Proceso constructivo del nuevo edificio *Agravitas*

La constructibilidad del nuevo edificio *Agravitas* ha requerido una estrategia minuciosa tanto en la fase de proyecto como en la fase de ejecución. El carácter estructural de péndulo invertido del edificio ha condicionado totalmente su proceso constructivo, ya que impone la necesidad de

ejecutar cuidadosamente un número reducido de actuaciones iniciales en el arranque de las Vs, antes de abordar simultáneamente una gran cantidad de operaciones estructurales en el volumen aéreo. En este sentido, la ejecución de las cimentaciones, los soportes en V y la pantalla de arriostramiento, que también proporciona estabilidad lateral durante la fase constructiva, ha representado el camino crítico del proceso constructivo, tanto en lo referente al cumplimiento de los plazos previstos como en la gestión financiera de la obra. En la Figura 22 se muestran las fases del proceso constructivo, enumeradas a continuación:

1. Ejecución de las cimentaciones.
2. Montaje y estabilización de las Vs; montaje de las celosías cargadero.
3. Izado y estabilización de las celosías principales longitudinales (tramo inferior).
4. Izado y colocación de las celosías transversales; hormigonado de P5.
5. Montaje por tramos de celosías longitudinales (tramo superior); hormigonado de P4.
6. Izado y montaje de cubierta.

Las maniobras de izado de las celosías longitudinales y transversales han requerido el uso de grúas móviles de gran tonelaje, con capacidad para elevar cargas de hasta 115 t en una única maniobra.

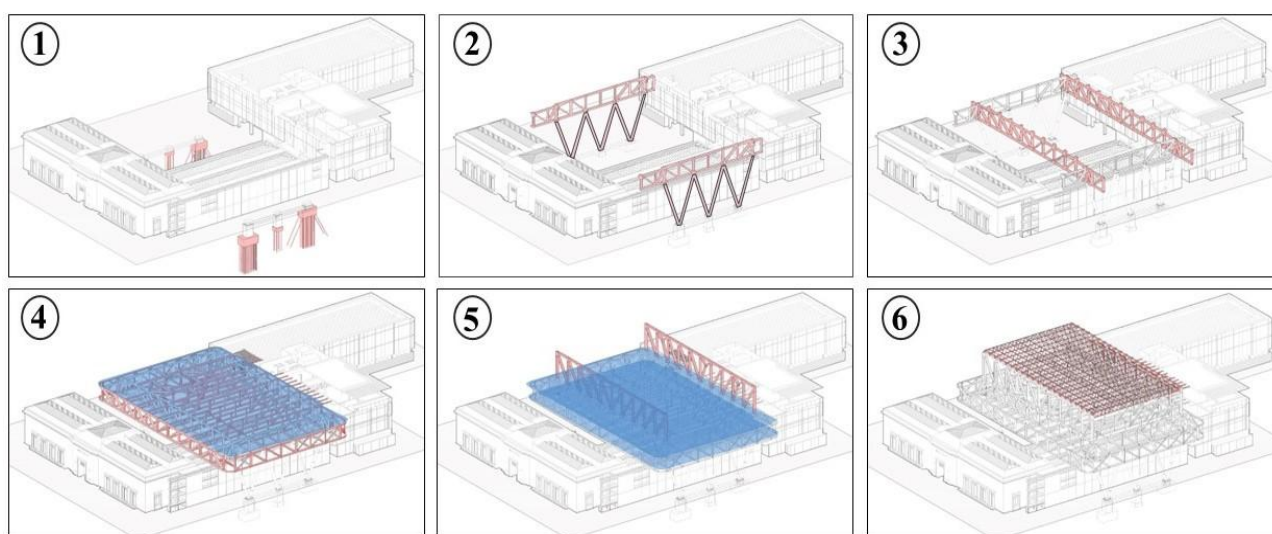


Figura 22. Esquema secuencial de las fases del proceso constructivo del edificio *Agravitas*.

5.Conclusiones

La ampliación de un museo con el prestigio e impacto mediático que caracterizan el Museo de Bellas Artes de Bilbao exigía un diseño que, además de sorprender, fuera respetuoso con la construcción preexistente y su entorno, que dotara a una ciudad ya muy icónica un nuevo elemento singular y atractivo, y que además cumpliera con todos los requerimientos funcionales que una entidad de este tipo demanda. El proyecto arquitectónico ha conseguido abordar estos retos con éxito, proporcionando una nueva imagen muy potente a una institución muy querida y apreciada por los bilbaínos. Desde el punto de vista estructural, los desafíos planteados han sido analizados y resueltos con un enfoque basado en la eficiencia estructural, la racionalidad constructiva y la mínima afección a la funcionalidad arquitectónica del edificio existente, lo que ha permitido que el museo se mantuviera operativo durante toda la ejecución de la obra

Gracias al ingenio y al trabajo en equipo de todos los participantes en las fases de diseño conceptual, proyecto y ejecución, se ha logrado la construcción de un edificio de gran valor arquitectónico, en el cual la singularidad

estructural es protagonista y queda patente frente a la mirada de ciudadanos y turistas.

Agradecimientos

El proyecto ha sido promovido por el Museo de Bellas Artes de Bilbao y desarrollado por los estudios de arquitectura Foster+Partners y LMU Arkitektura, con MC2 Estudio de Ingeniería como responsable del diseño estructural y TekArk Studio como Dirección de Ejecución. Todos estos actores han formado parte también de la Dirección de Obra y Asistencia Técnica a la misma. El contratista encargado de la construcción ha sido la UTE formada por las constructoras Urbelán, Altuna y Uria, Campezo y Teusa. Los talleres metálicos encargados de fabricar y montar la estructura metálica han sido Inbersa y RPM. La asistencia técnica a la constructora ha sido desarrollada por Ingzero y Arenas & Asociados.

Referencias

- [1] J. Martínez Calzón y M. Julià Vilardell. El proyecto ejecutivo y la construcción de la torre de Collserola. Hormigón y Acero, Vol. 43 Num 184, 1992.
- [2] UNE-EN 1998. Eurocódigo 8. Proyecto de estructuras sismorresistentes, 2018

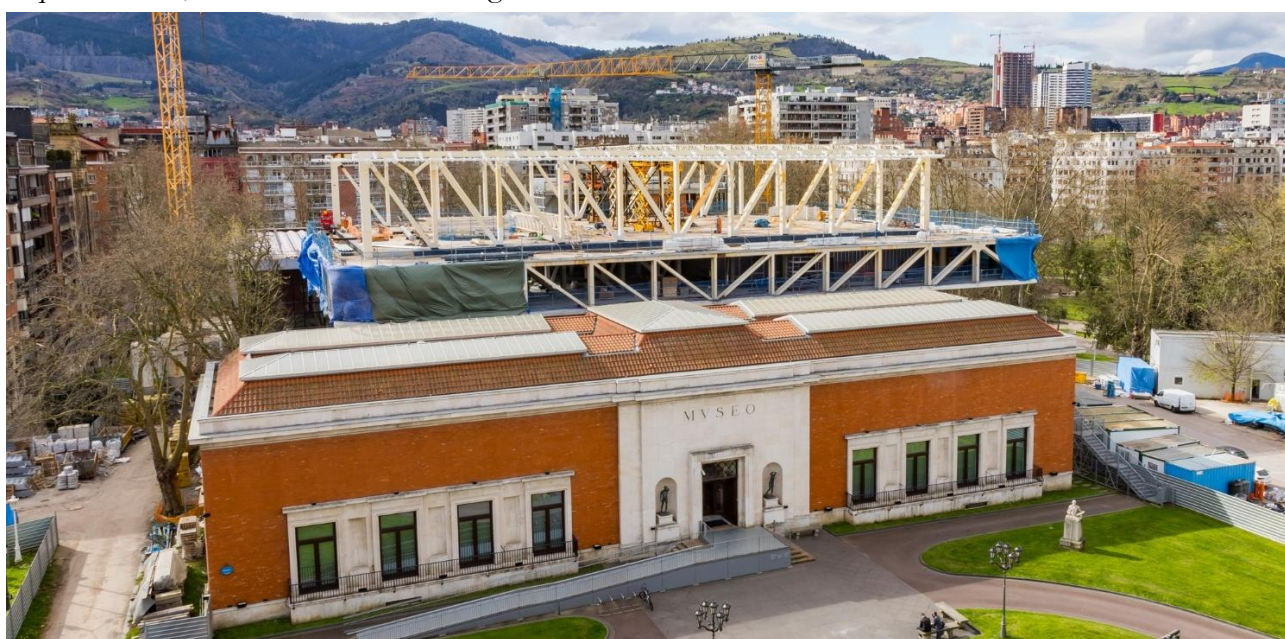


Figura 23. Perspectiva general de la estructura completa del edificio *Aggravitas*